

# 스텝 인덱스 멀티모드 광섬유를 이용한 광강도 변조방식 변위센서 설계모델 연구

신우철

한국기계연구원 지능기계연구센터  
Ⓣ 305-343 대전광역시 유성구 장동 171번지

홍준희<sup>†</sup>

충남대학교 기계공학과 BK21 메카트로닉스 사업단  
Ⓣ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지

(2006년 9월 1일 받음, 2006년 9월 1일 수정본 받음)

본 논문은 광강도 변조방식 광섬유 변위센서의 측정 메커니즘을 수식적으로 모델링하여 측정영역과 감도를 원하는 목적에 따라 유연하게 조정할 수 있는 설계모델을 제안하고 있다. 유도된 모델은 스텝 인덱스 광섬유를 적용한 경우로 제한되고 광섬유 센서의 변위 응답영역 중 front slope 측정영역 해석에 초점을 맞추었다. 또한 광섬유 설계 시 유도된 모델 적용이 용이하도록 수치적분 방식의 해석 프로세스를 소개하고 있다. 제안된 모델과 프로세스는 기본 설계변수 별로 실험결과를 통해 비교검증 되었다. 끝으로 검증된 모델을 통해 기본 설계변수에 따른 광섬유 변위센서의 변위응답 특성 경향을 분석하였다.

주제어 : Intensity modulation, Optical fiber sensor, Step index multimode optical fiber

## I 서 론

광강도 변조방식 광섬유 변위센서는 구조가 간단하고 구성 요소들이 모듈형태로 상용화되어있어 제작이 용이한 특징을 지니고 있다. 측정 가능한 대상도 자기센서나 정전용량형 센서와 같이 금속류에만 국한되지 않고 거의 모든 물체표면에 대해 변위 검출능력을 나타낼 수 있다. 특히 측정환경에 존재하는 전자파 방해(EMI) 잡음에 강인하고 매우 작고 경량인 프로브 구조를 구성할 수 있으므로 측정 공간상 제약이 비교적 적은 편이다.<sup>[1,2]</sup> 이와 같이 광섬유 변위센서는 제작 및 적용상 우수한 특징을 지니고 있어 다양한 분야에 응용연구가 이루어지고 있다.<sup>[1-7]</sup>

광섬유 센서의 변위응답 특성을 수학적 모델링한 기존의 연구들을 살펴보면 센서설계 측면에서 다음과 같은 한계점을 보이고 있다. 첫째 변위응답 특성 해석에 필요한 광섬유 투광 조도분포를 실험적으로 구한 경우이다.<sup>[2,8,9]</sup> 둘째 광섬유 센서의 변위응답 선도에서 front slope 영역에서 다소 큰 오차를 보이는 점과<sup>[2,8,10]</sup> back slope영역만 고려한 경우이다.<sup>[11]</sup> front slope 측정영역은 back slope 측정영역에 비해 측정구간은 다소 작을지라도 감도와 선형성이 우수하고 측정 대상에 보다 접근해서 측정할 수 있으므로 측정공간이 매우 협소한 경우에 적용이 보다 유리한 이점을 지니고 있다. 마지막으로 도출한 모델을 제한된 형태로만 비교검증한 점이다.<sup>[2,8-11]</sup> 즉, 그 모델식이 기본변수에 따른 결과의 경향분석까지 검증되어 설계에 적용 가능한지 여부가 명확하지 않다.

본 연구는 광강도 변조방식 광섬유 센서의 우수한 적용성에 부응하여 변위응답특성인 감도와 측정영역을 적용목적에 맞게 유연하게 조정할 수 있는 설계모델을 유도하고자 하였다. 선행연구 결과인 스텝 인덱스 광섬유 투광조도분포 모델을 적용하여<sup>[12]</sup> 실험식을 포함하지 않고 기본 설계 변수 설정만으로 변위응답 해석이 가능한 특징을 지니고 있다. 특히 센서의 변위응답 영역 중 front slope 측정영역 해석에 초점을 맞추어 기존 연구에 비해 보다 정확한 결과를 얻고자 하였다. 또한 유도된 모델을 설계 시 용이하게 적용할 수 있도록 해석 프로세스도 소개하고 있다. 기본 설계 변수값들을 변화시켰을 때 해석결과들을 각각 동일한 조건의 실험결과와 비교검증 함으로써 유도된 모델이 광섬유 센서의 변위응답의 경향 분석 및 설계에 적용 가능함을 입증하였다. 마지막으로 검증된 모델을 통해 기본 설계변수에 따른 변위응답 경향을 분석하여 설계의도와 접목시켜 고찰하였다.

## II. 변위검출 메커니즘 모델링

### 2.1 기본 구성 및 원리

그림 1은 광강도 변조방식 광섬유 변위센서의 기본 구조를 나타내고 있다. 광원인 레이저다이오드 또는 LED를 통해 발생한 빛이 투광섬유(transmitting optical fiber)를 통해 측정부로 전송되어 타겟 측정면에 조사되면 그 반사광은 수광섬유와 나란히 배치된 수광섬유(receiving optical fiber) 내부로 일부 입사된다. 이때 광섬유 끝단면들과 타겟 측정면의 사이의 공극(air gap) 크기에 따라 수광섬유 내로 입사되는 반사광속이 변하게 된다. 이 광속의 변화는 수광섬유를 따라 포

<sup>†</sup> E-mail: hongjh@cnu.ac.kr

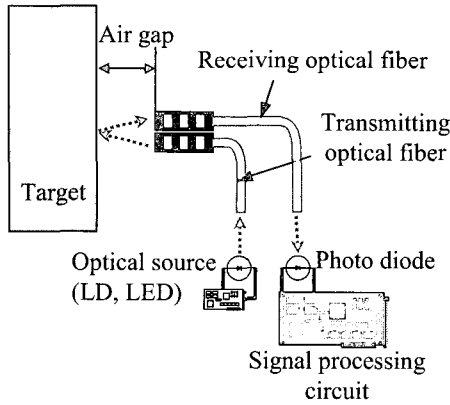


그림 1. 광강도 변조방식 광섬유 변위센서의 기본구성을 나타낸 그림.

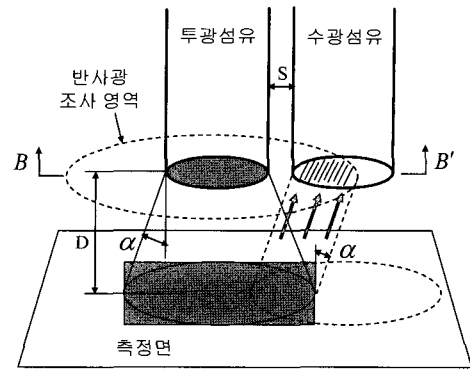
토다이오드로 전송되어 전류 신호로 변환된다. 이 전류 신호는 다시 신호처리회로를 통해 센서 출력 전압 신호가 된다. 이때 단일 파장 광원의 빛에 대해서 포토다이오드의 응답특성은 거의 일정하기 때문에 공극 크기 변화는 수광섬유로 입사되는 반사광속의 변화로 검출된다고 볼 수 있다. 공극은 센서와 타겟 사이의 상대변위가 되므로 광섬유 변위센서의 변위 응답특성은 공극 크기에 따른 수광섬유의 검출 반사광속 크기 관계로 이루어진다.

구체적으로 변위에 따른 수광섬유의 검출 반사광속 크기 관계는 그림 2(a)를 통해 설명할 수 있다. 도식된 바와 같이 투광섬유로부터 나오는 확산광은 특정 최대 한계방사각  $\alpha$ 로 타겟 측정면에 조사된다. 측정면을 전반사면(specular reflection surface)으로 가정 할 경우 동일한 각도로 반사된 빛은 수광섬유 끝단면 상에 일부 조사된다. 따라서 변위가 커질수록 수광섬유 끝단면 상의 반사광 조사영역이 확장되어 수광섬유 내로 입사되는 반사광속은 증가된다. 동시에 변위가 커질수록 역사승 법칙에 의해 반사광의 조도크기가 줄어드는 현상도 일어나게 된다. 그 결과 광섬유 센서는 그림 2(b)와 같은 전형적인 변위 응답곡선을 그리게 된다. 여기서 front slope 영역은 이 두 현상 중 첫 번째 현상이 우세하여 형성되는 부분이고 back slope 영역은 수광섬유 끝단면 전역역이 반사광 조사영역에 포함된 이후 두 번째 현상에 의해서만 형성되는 부분이다.

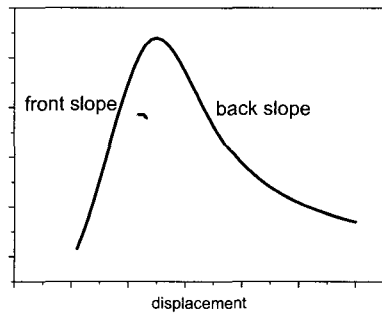
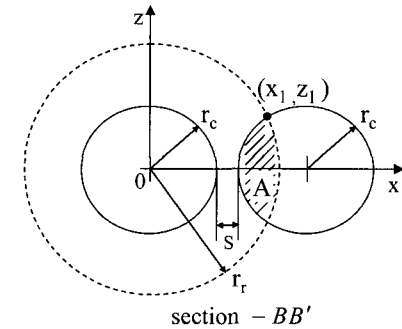
2.2 모델식 유도 및 변위응답 해석 프로세스

변위에 따라 수광섬유 내로 입사되는 광속의 크기는 그림 2에서 빗금친 영역인 수광섬유 끝단면 상의 반사광 조사영역 면적 A와 그 영역 내의 방사조도의 곱으로 유추할 수 있다. 수식적으로 수광섬유 입사 광속  $\phi_r$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 E는 A영역 내에 분포된 조도를 의미한다.

$$\phi_r = \int_A E dA \tag{1}$$



(a) 변위측정 원리



(b) 기본 변위응답 선도

그림 2. 기본 변위응답 특성.

변위에 따른 반사광의 조사면적은 기하광학적 해석을 통해 구할 수 있다. 관계변수로는 수광섬유 코어반경  $r_c$  두 광섬유 사이의 간격 S 그리고 최대 한계방사각  $\alpha$ 에 의해 결정된다.  $\alpha$ 는 선정된 광섬유의 NA를 통해 결정된다.<sup>[13]</sup> 측정면을 전반사면으로 가정할 경우 반사광 조사영역의 반경  $r_r$ 은 변위 D에 따라 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$r_r = r_c + 2D \tan\alpha \tag{2}$$

$r_r$  크기에 따른 A 크기는 다음식과 같다.

$$r_r \leq 3r_c + S \text{ 일 때,}$$

$$A(r_r) = 2 \int_0^{z_1} \int_{2r_c + S - \sqrt{r_c^2 - z^2}}^{\sqrt{r_c^2 - z^2}} dx dz \tag{3}$$

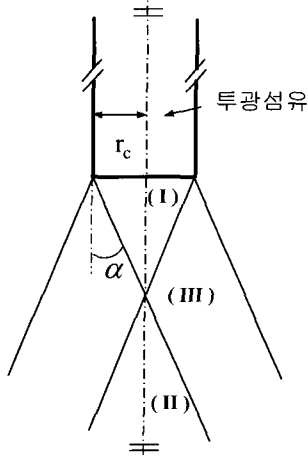


그림 3. 세 영역으로 구성된 광섬유 투광 조도분포 모델.

$r_f > 3r_c + S$  일 때,

$$A(r_r) = \pi r_c^2 \tag{4}$$

다음으로 조사영역의 방사조도 크기는 선행연구의 스텝 인덱스 광섬유 투광조도분포 모델을 통해 구할 수 있다. 그림 3과 같이  $\alpha$ 와  $r_c$ 에 의해 구분된 세 영역에 대해 조사위치  $(x_p, y_p)$ 에 따라 다음과 같은 방사조도식이 유도되었다.<sup>[12]</sup> 여기서  $M$ 은 투광섬유의 방사발산도(radiant exitance),  $L$ 은 방사휘도(luminance)를 의미한다.

(I)영역내 조사위치에서의 방사조도는 다음과 같이 일정하다.

$$E_I = M \tag{5}$$

(II)영역내 조사위치에 따른 방사조도는 다음식과 같다.

$$E_{II} = \frac{L\pi}{2} [1 - \cos(\theta_2 + \theta_1)] \tag{6}$$

여기서  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 다음과 같다.

$$\theta_1 = \sin^{-1} \frac{r_c - x_p}{\sqrt{y_p^2 + (r_c - x_p)^2}} \tag{7}$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \frac{r_c + x_p}{\sqrt{y_p^2 + (r_c + x_p)^2}}$$

(III)영역내 조사위치에 따른 방사조도는 다음식과 같다.

$$E_{III} = 2 \left[ \int_{x_p - r_c}^{x_0} \int_0^{\sqrt{r_c^2 - (x - x_p)^2}} \frac{L y_p^2}{(y_p^2 + z^2 + (x_p - x)^2)^2} dz dx \right. \\ \left. + \int_{x_0}^{r_c} \int_0^{\sqrt{r_c^2 - x^2}} \frac{L y_p^2}{(y_p^2 + z^2 + (x_p - x)^2)^2} dz dx \right] \tag{8}$$

여기서  $r_a$ 와  $x_0$ 는 다음과 같다.

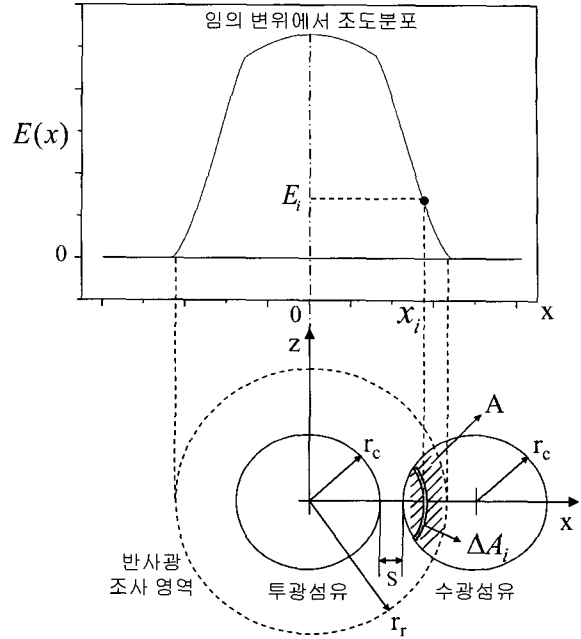


그림 4. 임의 변위에서 수광섬유 입사 반사광속을 구하기 위한 수치적분 개념.

$$r_\alpha = \sqrt{(x - x_p)^2 + z^2}$$

$$x_0 = \frac{r_c^2 - r_\alpha^2 + x_p^2}{2x_p} \tag{9}$$

따라서 투광섬유  $\alpha$ ,  $r_c$  그리고 투광섬유로부터 나오는 빛의 광파워를 통해 조사위치에 따라 조도크기를 구할 수 있다.

그림 4는 임의 변위  $D$ 에 대해 식(1)의  $\phi_i$  크기를 구하기 위한 수치적분 개념을 보이고 있다.  $A$ 를 미소면적으로 나누어  $x_i$  위치의 미소면적  $\Delta A_i$ 와 그 위치에 해당하는 조도  $E_i$ 의 곱을  $A$ 영역 전구간에 대해 합산하였다. 그림 5는 이 과정을 나타내는 알고리즘의 순서도이다. 입력변수로서  $\alpha$ ,  $r_c$ ,  $S$ , 조도분포 모델  $E(x_p, y_p)$ 이 정해지면 변위  $D$  입력에 대해 수광섬유 입사광속  $\phi_i$ 이 결과로 출력되는 광섬유 센서의 변위응답 해석 프로세스를 나타내고 있다. 여기서  $\Delta r$ 는 수치적분을 위한 미소영역 폭을 의미하고  $n$ 은 적분영역  $A$ 내의 미소면적의 개수를 의미한다.

### III. 모델 검증 및 결과고찰

#### 3.1 변위응답 검증

유도된 모델식과 해석 프로세스를 검증하기 위해 동일 조건의 실험결과와 비교하였다. 검증실험에 적용한 광섬유는 플라스틱 광섬유(Nuvitech Co., NuviLight J1-1000)로서 NA 0.38, 스텝 인덱스 굴절 분포를 지닌다. 적용한 광원은 650 nm 파장의 레이저 다이오드를 사용하였다. 수광섬유에 입사된 광속측정은 광파워 미터(ThorLabs Inc. S110)를 이용하여

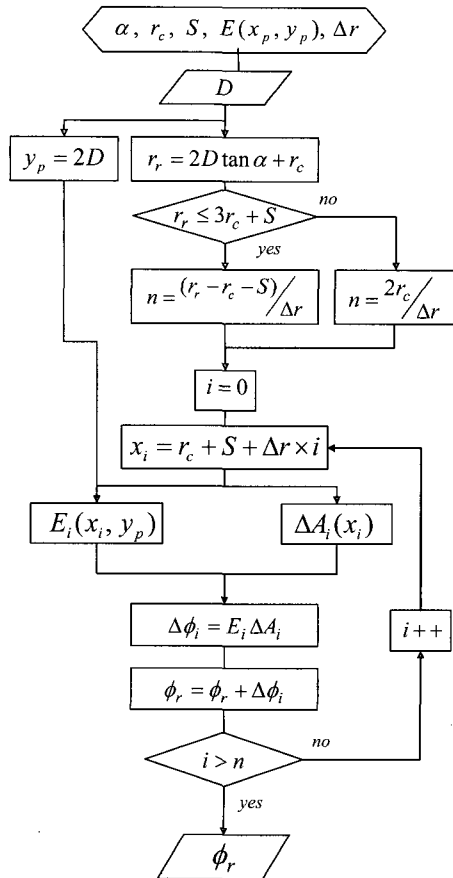


그림 5. 변위응답 해석 프로세스.

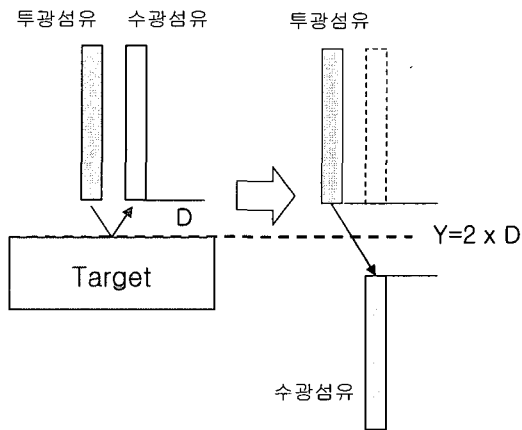


그림 6. 이상적인 전반사면을 고려한 모델검증실험 개념.

다. 본 연구의 해석범위는 타겟의 측정면 특성을 포함하고 있지 않기 때문에 검증실험은 측정면의 기준이 될 수 있는 전반사면을 고려하여 수행하였다. 그리고 이상적인 전반사면을 구현하고자 그림 6의 개념을 적용하였다. 수광섬유의 위치를 실제 프로브 형태에서 변형시켜 가상의 측정면에 대칭되는 위치에 놓음으로써 두 광섬유 단면 사이의 평행거리를 변위의 두 배로 간주하였다.

첫 번째 검증실험으로서 광섬유 센서의 변위응답을 투광섬

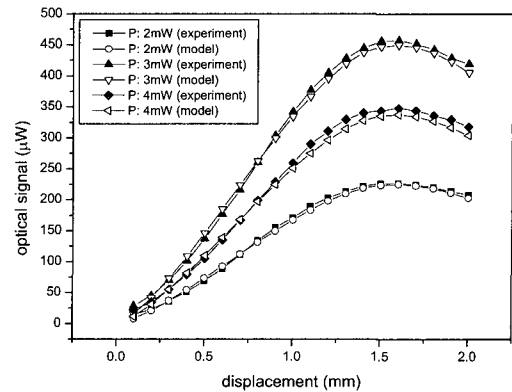


그림 7. 투광파워 크기에 따른 변위응답 검증결과.

유로부터 나오는 빛의 파워 크기 별로 비교검증 하였다. 그 실험결과를 그림 7에 보이고 있다. 측정영역으로 고려한 front slope 영역에서의 모델결과와 실험결과와의 오차율을 평가한 결과 세 경우 모두 5%이하로 나타났다.

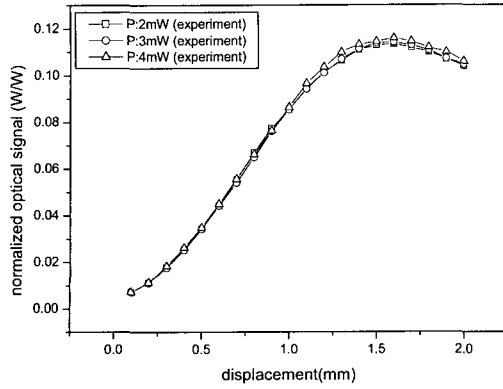
그림 8은 그림 7의 결과들을 각각의 광파워 크기값으로 일반화(normalization) 한 뒤 실험결과와 모델결과로 구분해서 보여주고 있다. 그림 8(a)의 실험결과를 보면 세 곡선이 거의 일치함을 보이고 있다. 이것은 광파워 크기가 변위응답곡선에 미치는 영향이 측정영역에 대해 동일한 비율로 적용되고 있음을 의미한다. 그리고 그 영향이 광파워 크기에 선형적임을 보이고 있다. 본 연구에서 유도된 모델식에 의한 결과 역시 이 특성을 나타내고 있음을 그림 8(b)를 통해 확인할 수 있다.

두 번째 검증 실험은 투광섬유와 수광섬유 사이간격 크기 별로 센서의 응답특성에 대해 모델식에 의한 이론적 결과와 측정실험 결과를 각각 비교하였다. 사이간격 S는 0.0mm와 0.2mm로 설정하였고 그 외의 조건은 모두 동일하게 했다. 그림 8의 결과를 근거하여 광파워 크기에 대해 일반화된 결과로써 비교하였다. 이는 비교검증 시 적용된 광파워 크기 변동에 대한 영향을 배제하기 위함이다. 그림 9는 비교검증 결과를 보여주고 있다. 두 경우 모두 전방경사 영역에 대해서 거의 일치하는 결과를 보여주고 있다.

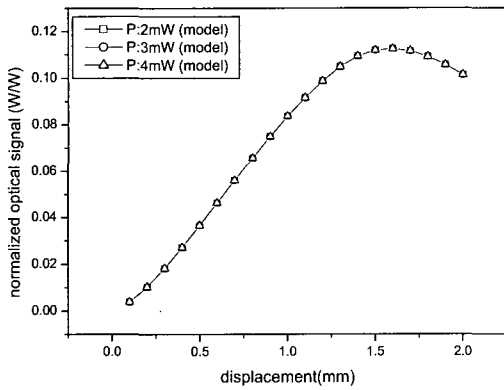
세 번째 검증 실험은 수광섬유의 코어 직경별로 실시하였다. 그림 10은 수광섬유의 코어직경이 0.98mm, 1.49mm일 때의 검증실험 결과를 보여주고 있다. 역시 수광섬유 코어 이외의 설계 변수는 동일하며 각각 광파워 크기에 대해 일반화된 결과로써 비교하고 있다. 두 경우 모두 전방경사 부분에 대해서 거의 동일한 결과를 보여주고 있다. 단, 코어 직경 1.49mm 수광섬유 경우 코어 직경 0.98mm에 비해 다소 큰 오차를 보였다. 그 원인으로 대구경 광섬유에 대한 단면 가공 및 조립 오차로 사료된다.

### 3.2 변위응답 특성분석

유도한 광섬유 센서의 변위측정 모델을 이용하여 기본 설계변수에 따른 변위 응답특성 경향을 분석하였다. 고려한 설



(a) 실험결과



(b) 모델결과

그림 8. 투광파워 크기에 따른 변위응답선도의 일반화 특성 비교.

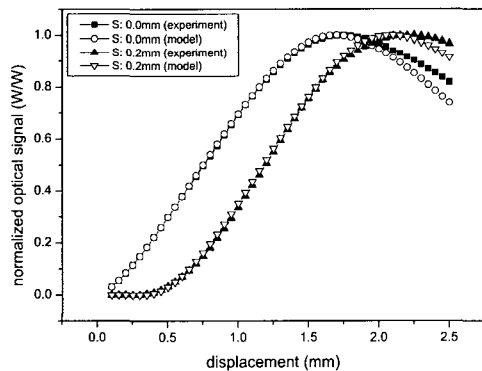


그림 9. 광섬유 사이간격 크기에 따른 변위응답 검증결과.

계변수로는 투광섬유 끝단면 출력 광파워, 수광섬유 코어직경, 광섬유 사이간격을 고려하였다. 분석한 변위 응답특성의 항목으로 각 응답곡선의 front slope 영역에 대한 측정구간의 크기 및 위치, 감도 특성을 고찰하였다. 여기서 측정구간은 선형성이 1.0 % FSO 이하인 구간을 0.1mm 단위로 평가한 결과이다. 이와 같은 설계조건에 따른 변위 응답특성 평가 결과를 표1에 정리하였다.

표1의 결과로부터 다음 사항을 고찰할 수 있었다. 첫 번째 광파워 크기에 따른 광섬유 센서의 변위 응답곡선의 경향을 살펴보면 그림 7,8에서도 고찰한 바와 같이 광파워 크기에

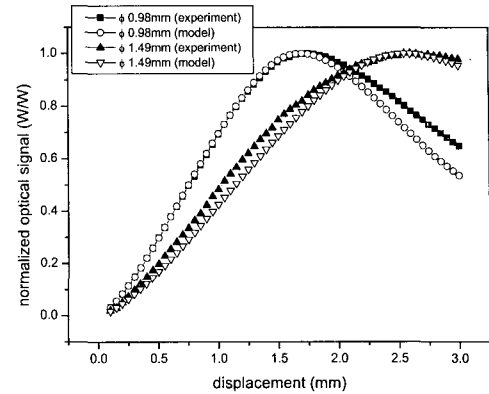


그림 10. 수광섬유 직경크기에 따른 변위응답 검증결과.

표 1. 기본 설계변수에 따른 front slope 측정영역 변위응답 특성.

| 광파워 (mW) | 코어직경 (mm) | 사이간격 (mm) | 측정구간 (mm) | 감도 (mW/mm) |
|----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1        | 0.98      | 0.0       | 0.3 ~ 1.0 | 91.57      |
| 2        | 0.98      | 0.0       | 0.3 ~ 1.0 | 183.14     |
| 3        | 0.98      | 0.0       | 0.3 ~ 1.0 | 274.72     |
| 3        | 1.47      | 0.0       | 0.4 ~ 1.5 | 182.98     |
| 3        | 1.96      | 0.0       | 0.6 ~ 2.0 | 137.82     |
| 3        | 0.98      | 0.2       | 0.8 ~ 1.4 | 211.96     |
| 3        | 0.98      | 0.4       | 1.2 ~ 1.8 | 164.77     |
| 3        | 0.98      | 0.6       | 1.5 ~ 2.1 | 131.76     |

의해 전 측정영역의 변위응답 크기가 선형적으로 변하므로 측정구간의 위치와 크기는 동일한 상태에서 센서의 감도만 비례적으로 변함을 볼 수 있다. 즉, 광파워 크기에 의해 센서 신호의 감도 조정이 이루어질 수 있음을 고찰할 수 있다. 두 번째 수광섬유의 코어 직경에 따른 센서의 변위 응답곡선의 경향을 살펴보면 수광섬유의 코어의 직경이 커질수록 측정영역이 넓어지는 반면에 감도는 떨어지는 경향을 볼 수 있다. 그 원인은 코어 직경이 커질수록 반사광 조사영역이 수광섬유 단면을 완전히 포함하기 시작한 포인트의 위치가 큰 변위 쪽으로 이동되기 때문이다. 따라서 front slope 영역이 늘어나게 되고 상대적으로 기울기는 감소하게 된다. 따라서 코어 직경에 의한 감도의 변화는 광파워 크기로 보상할 수 있음을 전제할 때 보다 넓은 측정영역의 센서 특성을 원하는 경우 보다 큰 코어직경의 수광섬유로 프로브를 설계해야 함을 고찰할 수 있다.

마지막으로 투광섬유와 수광섬유 사이의 간격에 따라 센서의 변위 응답곡선의 경향을 살펴보면 사이간격이 커질수록 전방경사 영역의 감도는 다소 떨어진다. 그리고 측정영역의 구간크기는 동일하나 위치가 큰 변위 쪽에 형성되는 경향을 볼 수 있다. 광섬유 사이 간격은 변위에 따라 확대되는 반사광 조사영역이 수광섬유 단면상에 처음 조사되는 포인트를 결정하게 된다. 한 예로 S 0.6mm 프로브 경우에는 변위가

1mm 이상이 될 때까지도 수광섬유 내로 반사광이 입사되지 않게 된다. 사이간격이 클수록 상대적으로 감도가 떨어지는 이유는 그만큼 확대된 조도분포 상태의 반사광이 수광섬유 내로 입사되므로 조도의 크기가 상대적으로 작은 상태이기 때문이다. 따라서 사이간격에 의해 변하는 감도는 광파워 크기로 보상할 수 있기 때문에 사이간격을 통해 변위 측정영역 위치를 조정할 수 있음을 고찰할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구는 광섬유 변위센서의 감도와 측정구간 범위를 적용목적에 맞게 조정 가능한 설계모델을 제안하고 있다. 선행 연구의 스텝 인덱스 광섬유 투광조도분포 모델을 토대로 광강도 변조방식 변위응답 메커니즘을 수학적으로 모델링하였다. 특히 변위응답곡선 중 front slope 영역 해석에 초점을 맞추고 있다. 구체적으로 다음 연구결과를 도출하였다.

- (1) 기하광학적 해석을 통해 변위에 따라 변하는 수광섬유 끝단면에 조사되는 반사광 면적을 광섬유 코어 반경, 한계 방사각 그리고 두 광섬유 사이거리 파라미터들을 이용하여 모델식을 유도하였다.
- (2) 변위에 따라 수광섬유 내로 입사되는 반사광속은 수광섬유 끝단면의 반사광 조사면적과 그 영역의 조도분포를 수치적분하는 방식으로 구하였다. 그리고 이에 해당하는 일련의 과정을 나타내는 해석 프로세스를 제시하고 있다.
- (3) 유도된 모델식과 해석 프로세스를 검증하기 위해 실험결과와 비교하였다. 이때 세 가지 기본 설계변수값을 변화시켜 수행하였다. 첫 번째 검증실험으로 광파워 크기 별로 변위응답을 비교한 결과 5% 이내의 오차율을 확인하였다. 특히 실험결과를 통해 광파워 크기에 따라 변위응답의 크기가 선형적으로 변하는 것을 고찰하고 유도된 모델식의 결과도 동일한 특성을 보임을 확인하였다.
- (4) 두 번째 검증실험으로 수광섬유 코어 직경 크기 별로 변위응답을 비교한 결과 거의 일치함을 확인하였다.
- (5) 마지막 검증실험으로 두 광섬유 사이간격 크기 별로 변위응답을 비교한 결과 유사함을 확인하였다.
- (6) 검증된 모델식을 통해 기본 설계변수인 광파워, 수광섬유 코어직경, 광섬유 사이간격에 의해 센서의 감도 및 측정영역 변화 경향을 고찰하였다. 그 결과 광파워 크기로 센서의 감도조정이 가능한 것과 수광섬유 코어직경이 커질수록 측정영역이 넓어지는 것 그리고 광섬유 사이간격이 커질수록 측정영역의 위치가 변위가 큰 쪽으로 이동하는 경향을 고찰할 수 있었다.

이로써 제안한 모델이 스텝 인덱스 광섬유를 적용한 광강도 변조방식 광섬유 변위센서의 front slope 영역의 변위응답

해석과 센서 설계 시 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단한다.

#### 참고문헌

- [1] Y. Zhao, P. Li, C. Wang and Z. Pu, "A novel fiber-optic sensor used for small internal curved surface measurement", *Sensors and Actuators*, Vol. 86, pp. 211-215, 2000.
- [2] Y. Yang, K. Yamazaki, H. Aoyama and S. Matsumiya, "Fiber optic surface topography measurement sensor and its design study", *Precision Engineering*, Vol. 24, pp. 32-40, 2000.
- [3] H. Golnabi, "Mass measurement using an intensity-modulated optical fiber sensor.", *Optics and Laser in Engineering*, Vol. 38, pp. 537-548, 2002.
- [4] M. E. Patton and M. W. Trethewey, "A Technique for Non-intrusive Modal Analysis of Very lightweight Structures", 5th International Modal Analysis Conference, 1987.
- [5] F. J. Crispi, G. C. Maling and A. W. Rzant, "Monitoring Microinch Displacement in Ultrasonic Welding Equipment", *I.B.M. Journal of Research and Development*, Vol. 10, No. 3, 1972.
- [6] K. S. Lee, J. H. Hong and W. C. Shin, "Development of Optical Fiber Displacement Sensor for Non-contact Vibration Measurement in the High Speed Rotation System", *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 8, pp. 50-56, 2005.
- [7] Y. Zhao and Y. Liao, "Single-mode fiber-based reflex sensor for internal surface in-line measurement of small products", *Sensors and Actuators A*, 3476, pp. 1-7, 2002.
- [8] R. Bailly-Salins, "Plastic optical fiber displacement sensor for study of the dynamic response of a solid exposed to an intense pulsed electron beam", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 46, No. 7, 1975.
- [9] R. O. Cook and C. W. Hamm, "Fiber optic lever displacement transducer", *APPLIED OPTICS*, Vol. 18, No. 19, pp. 3230-3241, 1979.
- [10] G. He and F. W. Cuomo, "A Light Intensity Function Suitable for Multimode Fiber-Optical Sensors," *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, Vol. 9, No. 4, pp. 545-551, 1991.
- [11] B. J. Kim, S. H. Kim, Y. W. Lee, P. Sainsot, L. Flamand, "Development of Optical Fiber Coupled Displacement Probe Sensor with a New Compensation Method", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 12, pp. 27-32, 2002.
- [12] 신우철, 홍준희, "스텝 인덱스 멀티모드 광섬유의 투광조도분포 모델링", *한국광학회지*, 제17권 2호, pp. 136-142, 2006.
- [13] Kjell J. Gasvik, "Light propagation through optical fiber", *Optical metrology*, Vol.2, pp. 277-278, 1995.

## **Design Model of Intensity Modulation Type Displacement sensor Using Step-index Multimode Optical Fiber**

Woo-Cheol Shin

*Intelligent Machine Systems Center, Korea Institute of Machinery and Materials 171 Jang-Dong, Yusong-Gu, Daejeon, 305-343, South Korea*

Jun-Hee Hong<sup>†</sup>

*Department of Mechanical Engineering, BK21 Mechatronics Group at Chungnam National University 220, Kung-Dong, Yusong-Gu, Daejeon, 305-764, South Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: hongjh@cnu.ac.kr*

(Received September 1, 2006, Revised manuscript September 1, 2006)

An optical fiber displacement sensor has the advantages of relatively simplicity, cheap, small probe size and immunity against environmental perturbation. The working principle of the sensor is based on the intensity modulation that is detection light intensity reflecting from the surface being measured. This paper presents the mathematical model of displacement measurement mechanism of this sensor type. The theoretical and experimental data are compared to verify the model in describing the realistic approach to sensor design. Finally, the analysis results show that displacement response characteristics such as sensitivity, measuring range are easily modified by principal design parameters such as magnitude of optical power, diameter of optical fiber core and distance between transmitting fiber and receiving fiber.

OCIS code : 060.2370, 080.2720.